



# Optyka nanostruktur

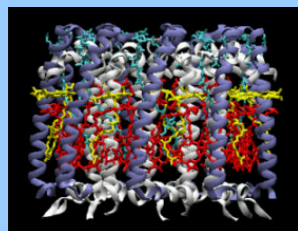
Sebastian Maćkowski

Instytut Fizyki

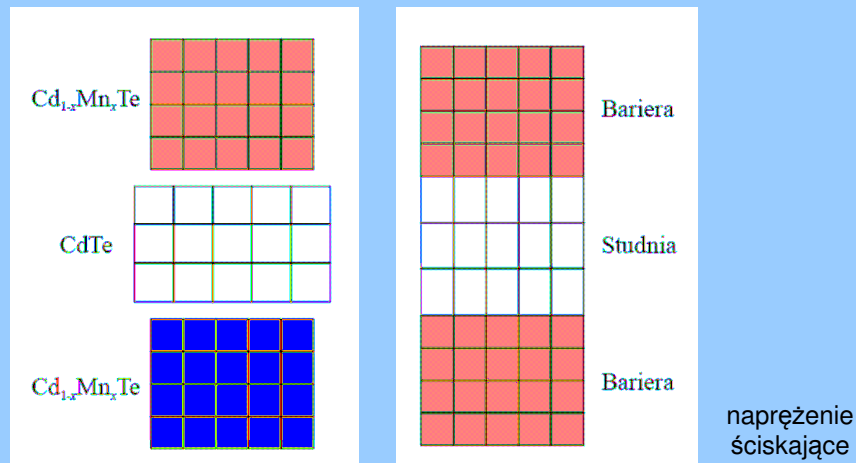
Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Adres poczty elektronicznej: mackowski@fizyka.umk.pl

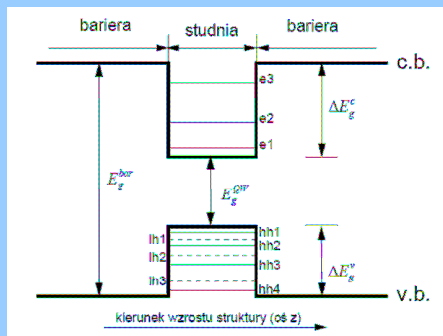
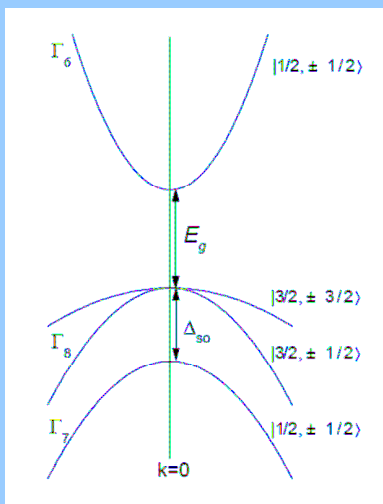
Biuro: 365, telefon: 611-3250



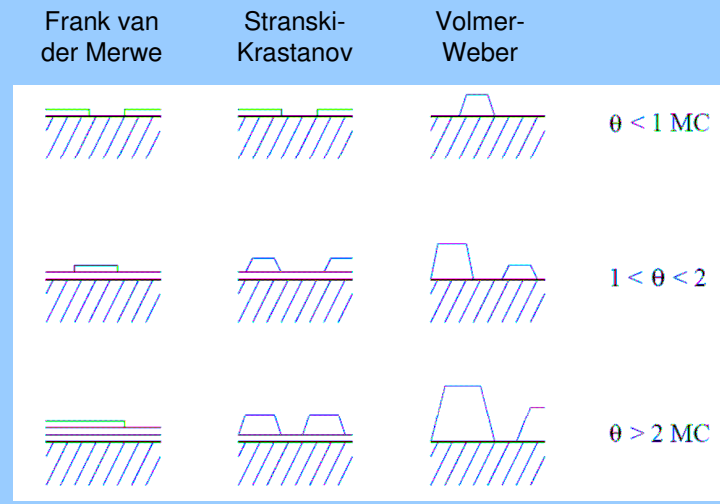
# Wzrost pseudomorficzny



# Ekscyton

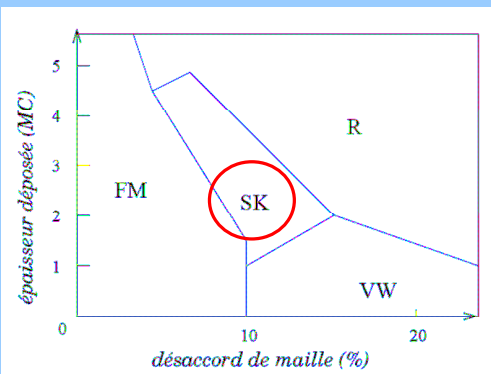


# Mody wzrostu





## Diagram fazowy

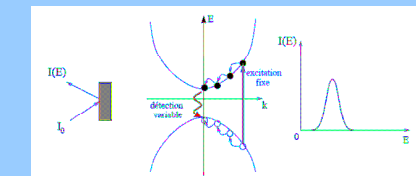
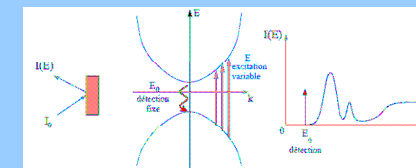
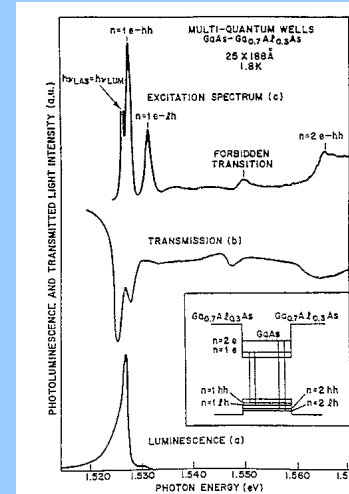


Composés	Désaccord de maille (%)
<i>InAs/GaAs</i>	7,2
<i>CdSe/ZnSe</i>	6,8
<i>GaN/AlN</i>	2,4(c); 2,7(h)
<i>Si<sub>0,7</sub>Ge<sub>0,3</sub>/Si</i>	1,2
<i>CdTe/ZnTe</i>	6,2

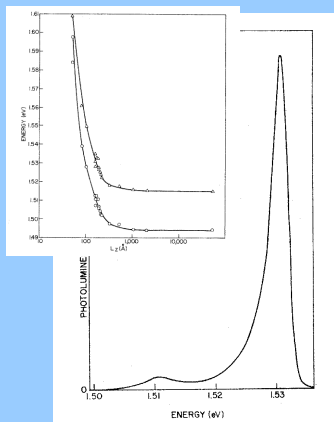
tak powstają kropki kwantowe



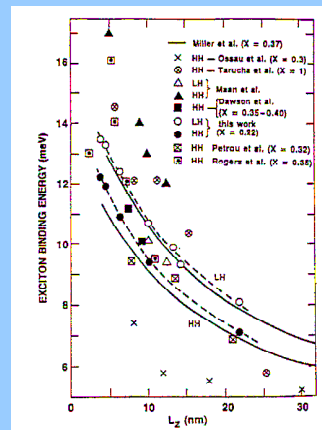
## Spektroskopia optyczna



## Własności optyczne QW



zależność energii emisji ekscytonu od szerokości studni kwantowej

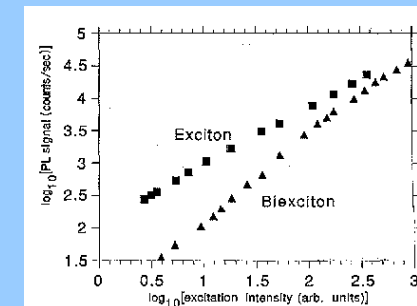
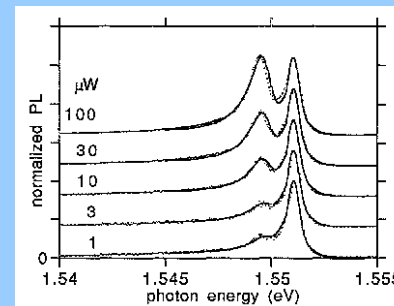


pomiar energii wiązania ekscytonu



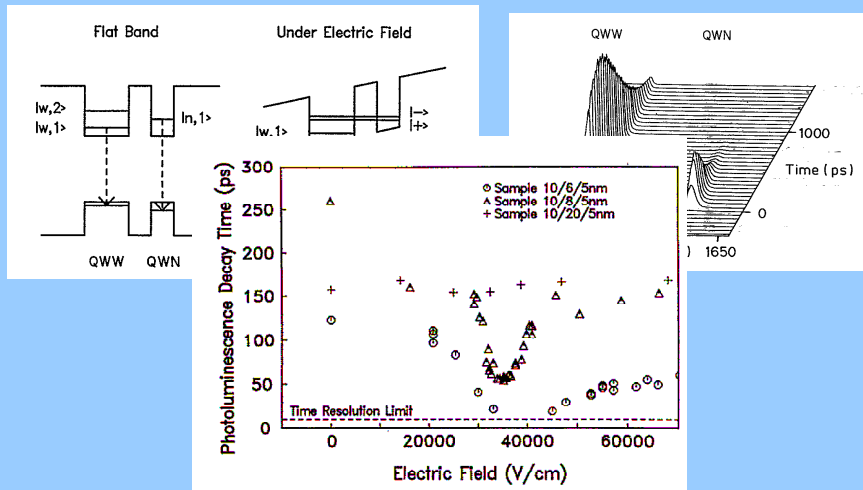
## Własności optyczne QW

obserwacja bieksytonów





# Własności optyczne QW



# Własności optyczne QW

## ekscyton skośny

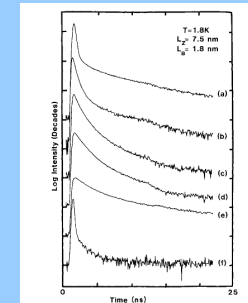
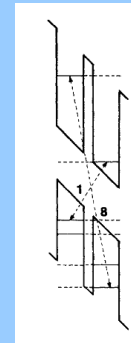
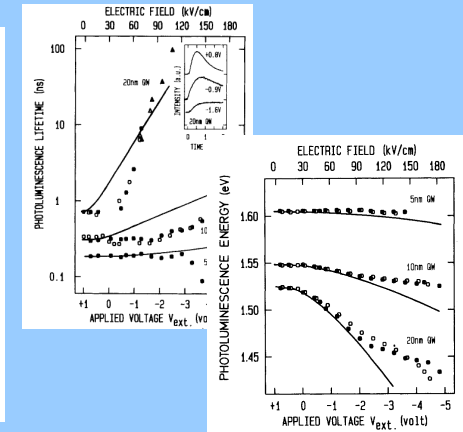


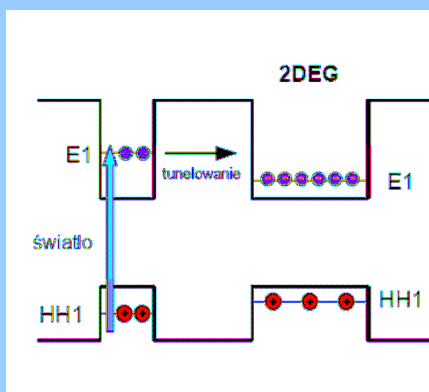
FIG. 3. The luminescence decay of exciton peaks PL (curves (a)-(e) correspond to transition 1 and curve (f) corresponds to transition 2) under various bias voltages. Each of the tick marks on the vertical scale represents one decade of intensity. The transient curves represent decays having time constants of (a)  $V = 1.5 V$ ,  $\tau = 0.19 ns$ ; (b)  $V = 1.0 V$ ,  $\tau = 0.31 ns$ ; (c)  $V = 0.75 V$ ,  $\tau = 0.61 ns$ ; (d)  $V = 0.50 V$ ,  $\tau = 1.0 ns$ ; (e)  $V = 0.275 V$ ,  $\tau = 1.91 ns$ ; (f)  $V = 1.0 V$ ,  $\tau = 0.10 ns$  (transition no. 2).

## efekt Starka

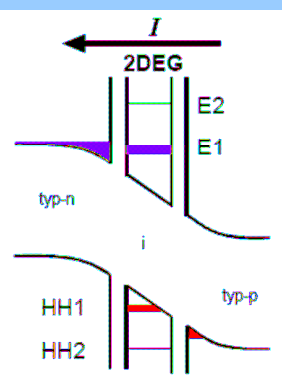


# Generacja nośników

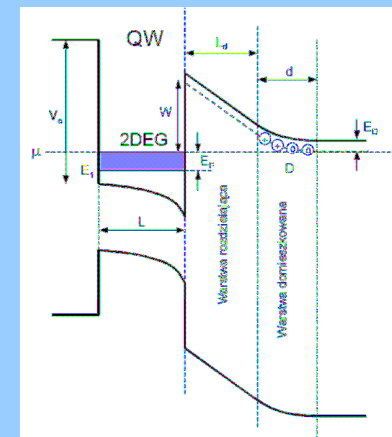
## generacja optyczna



## złącze pin



# Domieszkowanie



domieszkowanie modulatoryjne:  
wysokie koncentracje i rekordowe ruchliwosci nośników wskutek oddzielenia nośników od zjonizowanych domieszek

Bell Labs 1978



## Trion

VOLUME 71, NUMBER 11      PHYSICAL REVIEW LETTERS      13 SEPTEMBER 1993

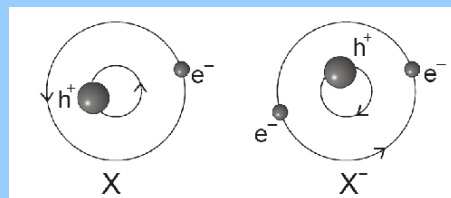
### Observation of Negatively Charged Excitons $X^-$ in Semiconductor Quantum Wells

K. Kbiang,<sup>1</sup> R. T. Cox,<sup>1</sup> Y. Merle d'Aubigné,<sup>2</sup> Franck Bassani,<sup>2</sup> K. Saminadayar,<sup>1</sup> and S. Tatarenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département de Recherche Fondamentale sur la Matière Condensée, Commissariat à l'Énergie Atomique, Boite Postale 65X, 38041, Grenoble Cedex, France

<sup>2</sup>Laboratoire de Spectrométrie Physique, Université Joseph Fourier, Centre National de la Recherche Scientifique, Boite Postale 87, 38042, Saint Martin d'Hères Cedex, France  
(Received 1 June 1993)

The negatively charged exciton  $X^-$  is identified by its circular polarization properties in 1.7 K magnetoabsorption spectra of CdTe-Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te multiple quantum wells modulation doped with electron concentrations  $N_e \approx 2 \times 10^{10}$  to  $1.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . The binding energy of the second electron of  $X^-$  is 0.20 3D rydbergs at 100 Å well width. The species  $X^-$  and the neutral exciton  $X$  exist in zero field for low  $N_e$ . At  $N_e = 1.45 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  a Fermi edge singularity is seen at  $B=0$  but  $X^-$  appears with field, at filling factor  $\nu=2$ , while  $X$  appears at  $\nu=1$ .



SL 2008/2009



## Naładowany ekscyton

The exciton ( $X$ ), an electron and a hole bound together by their Coulomb interaction, is the analog in a semiconductor of the hydrogen atom in vacuum. The electron-hole binding energy is typically 1–50 meV. Lampert [1] hypothesized in 1958 the existence of a related species, the negatively charged exciton ( $X^-$ ), that is two electrons bound to one hole, analogous to  $H^-$ . The energy of binding of the second electron in  $X^-$ ,  $E_{b2}$ , was expected to be  $\approx 0.055R$ , by analogy with the energy of dissociation of  $H^-$  into  $H^0$  and a free electron (here  $R$  is the effective Rydberg,  $R \approx m_e^* e^2 / m_0 \epsilon^2$ ). More precisely, calculations for bulk semiconductors taking account of the finite ratio of electron and hole masses predict somewhat lower values, e.g.,  $E_{b2} = 0.030R$  for  $m_e^* / m_h^* = 0.5$  [2].

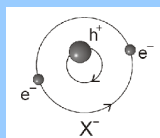
dla CdTe:  $R \sim 13 \text{ meV}$

dla 2D – wzrost energii wiązania o rząd wielkości

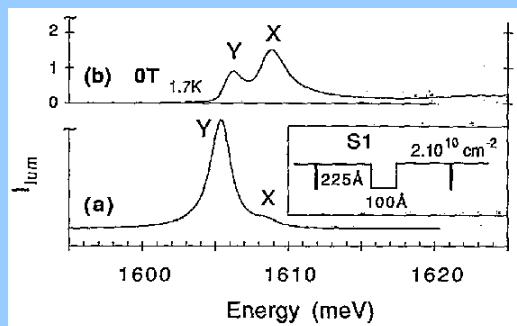
SL 2008/2009



## Naładowany ekscyton



$E_B = 2.65 \text{ meV}$

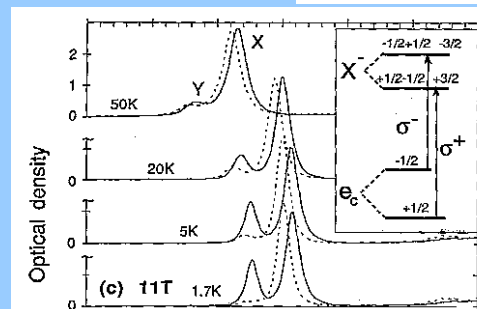
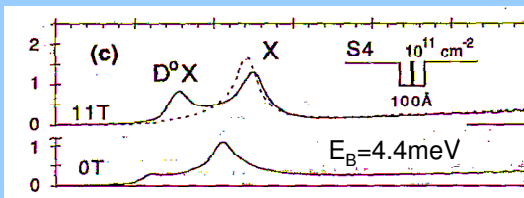
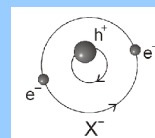


udowodnienie istnienia ujemnie naładowanego ekscytonu:  
stwierdzenie innej energii wiązania dla  $D^0X$   
zachowanie w polu magnetycznym

SL 2008/2009



## Naładowany ekscyton

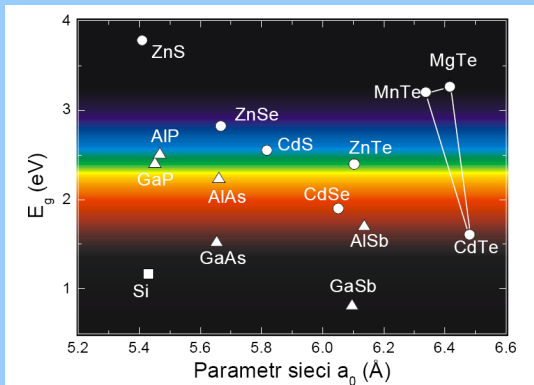


linia Y wykazuje silną polaryzację kołową  $\sigma^+$   
linia X słabo spolaryzowana  
polaryzacja linii Y zanika ze wzrostem temperatury

SL 2008/2009



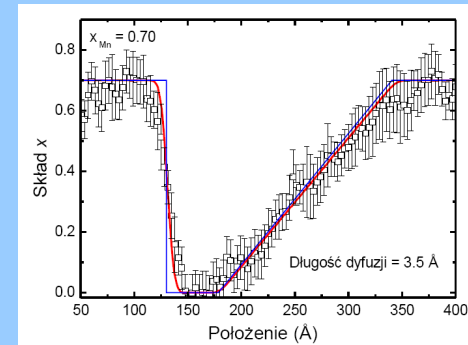
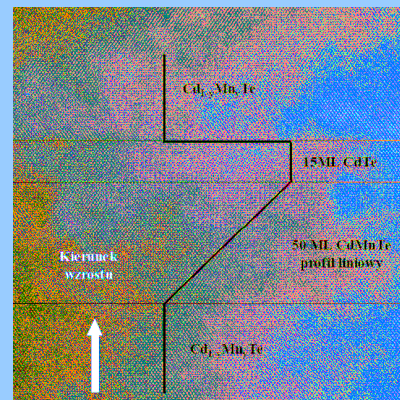
## Studnie profilowane



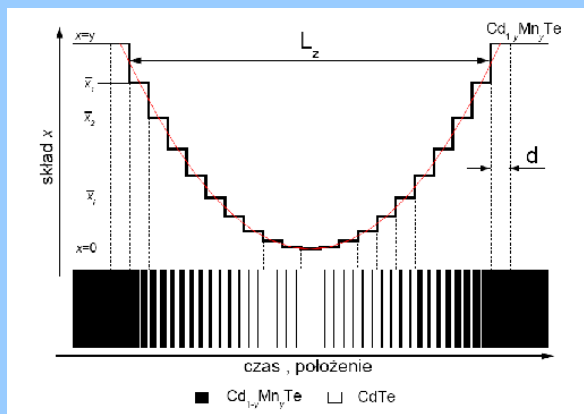
kontrolowana i stopniowa zmiana koncentracji – możliwość tworzenia innych niż prostokątne studni kwantowych



## Studnia trójkątna



## Studnia paraboliczna

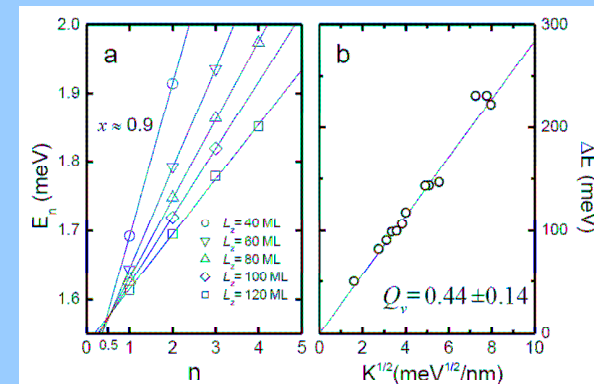
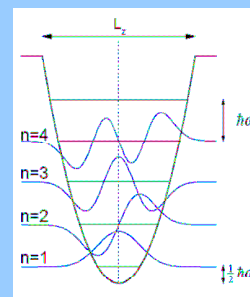


wzrost cyfrowy (digital growth)



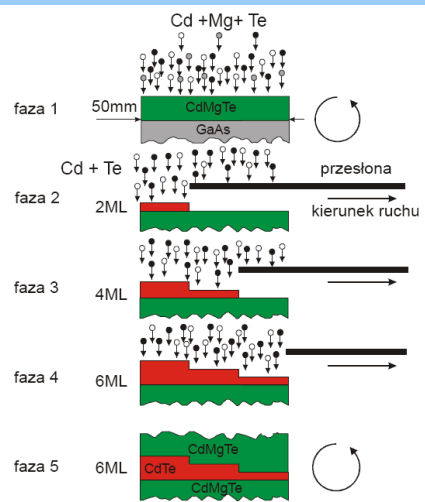
## Studnia paraboliczna

oscylator harmoniczny





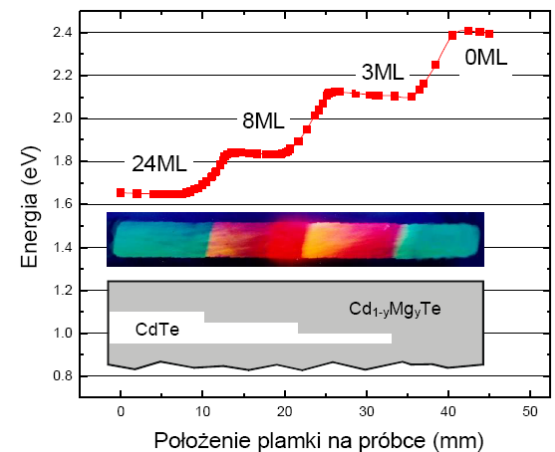
## Struktury schodkowe



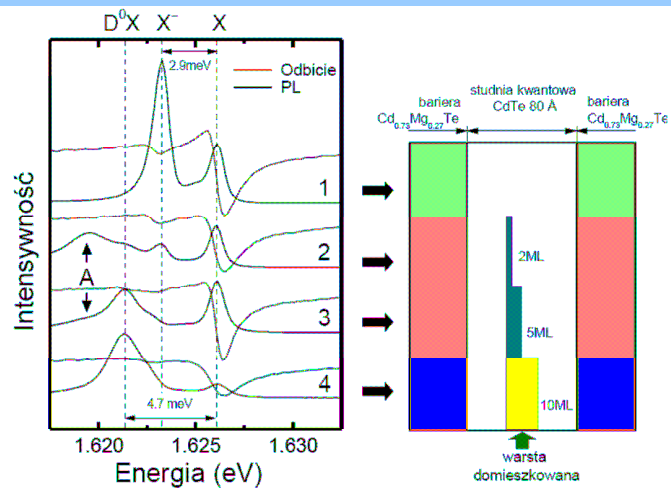
skokowa (lub ciągła) zmiana wybranego parametru studni kwantowej przy zachowaniu pozostałych parametrów



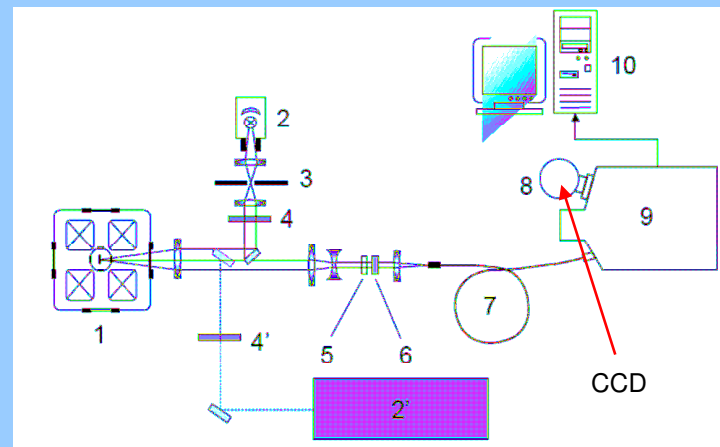
## Struktury schodkowe



## Triony raz jeszcze



## Dygresja aparaturowa





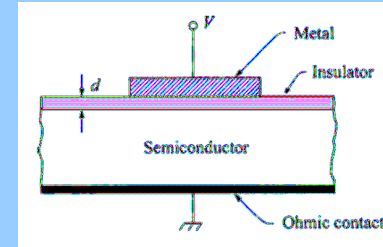


# Detektor CCD



# Kondensator MOS

złącze metal – izolator – półprzewodnik: podstawowy element CCD



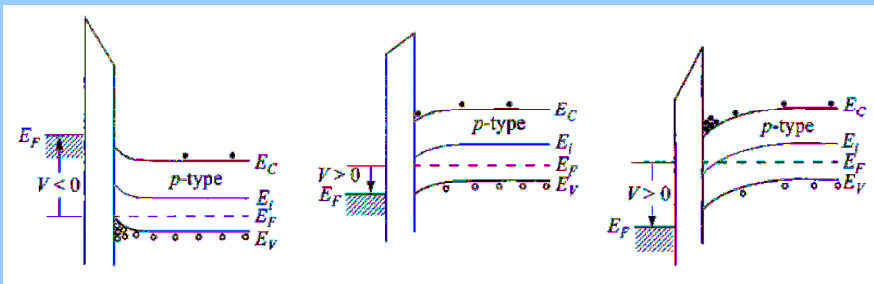
# Kondensator MOS

półprzewodnik typu p

akumulacja

zubożenie

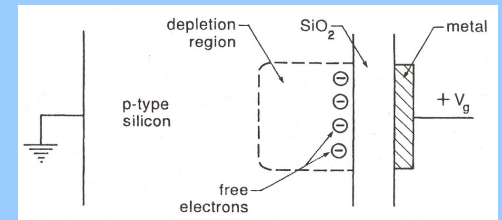
inwersja



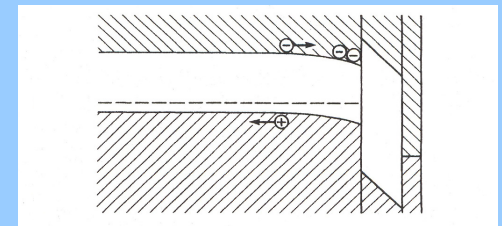
# Pojedynczy kondensator

pixel – picture element

Si, typ p, w warunkach inwersji  
kondensator elektronowy



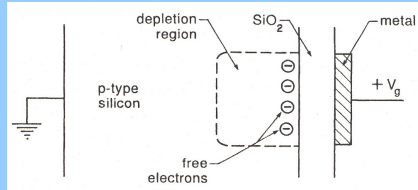
**przyłożenie napięcia  $V_g$ :**  
odpływ dziur – warstwa  
zubożona  
wolne elektrony na złączu



**absorpcja fotonu:**  
rozbiecie pary elektron-dziura  
brak rekombinacji w warstwie  
zubożonej



## Frontside illumination



grubość warstwy krzemu domieszkowanego na typ p ~ 100  $\mu\text{m}$

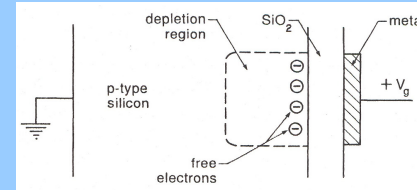
oświetlenie poprzez elektrodę pierwsze CCD – metal (max. 512) obecnie – cienka warstwa krzemu silnie domieszkowana

**problem:** silna absorpcja dla fali krótszych niż 400 nm

SL 2008/2009



## Backside illumination



warstwa krzemu ~ 10  $\mu\text{m}$  (nie może być zbyt cienka!) opracowanie technologii ~ 10 lat silne niejednorodności w procesie ścieniania, tworzenie się tlenków

dużo lepsza czułość w zakresie światła widzialnego i nadfioletu konieczność dyfuzji nośników wygenerowanych przez fotony do strefy zubożonej niekorzystny wpływ stanów powierzchniowych

**wniosek:** życie nie jest proste ☺

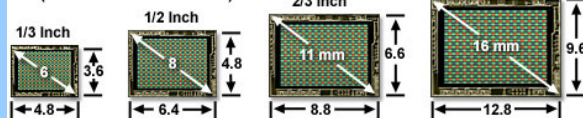
SL 2008/2009



## Zadania CCD

### Common CCD Image Sensor Formats

(Dimensions in Millimeters)



detektor CCD musi wykonać cztery podstawowe zadania

1. Wytworzenie ładunku (poprzez efekt fotoelektryczny wewnętrzny)
2. Zmagazynowanie ładunku (dzięki napięciu bramki)
3. Przekaz ładunku (dzięki sekwencji napięć na elementach piksela)
4. Odczyt ładunku – paczki ładunku detekowane są jako napięcie

SL 2008/2009



## Przekaz „ładunku”

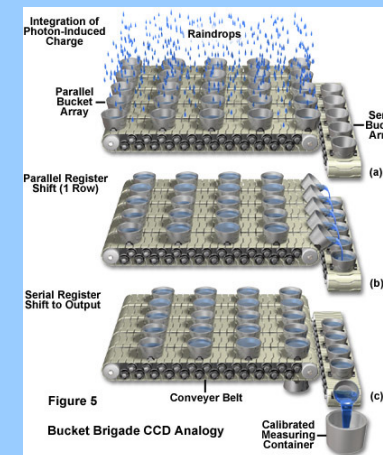


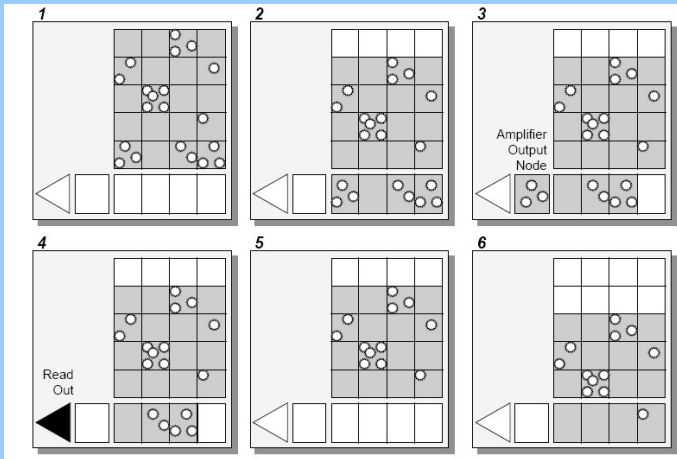
Figure 5

SL 2008/2009





## Przekaz ładunku

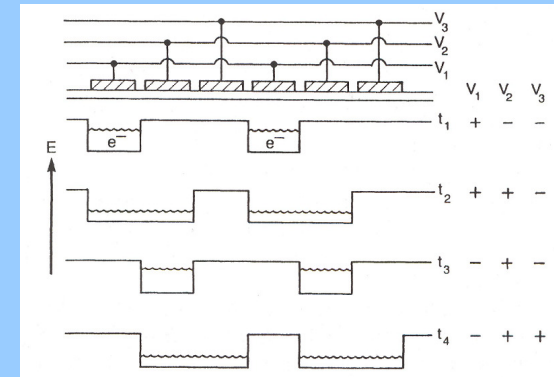


SL 2008/2009



## Przekaz ładunku

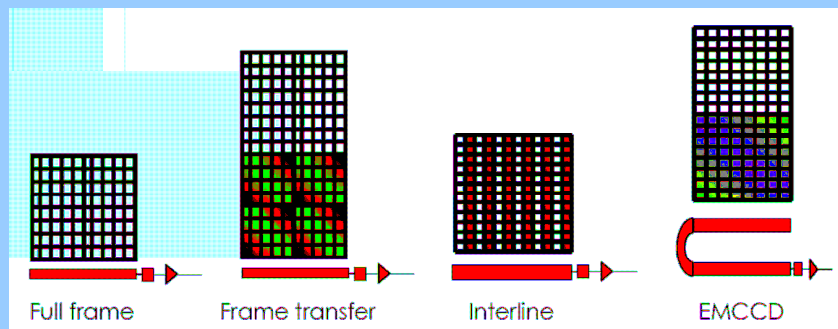
sekwencja napięć prowadzi do transferu ładunku  
detektor CCD trójfazowy



SL 2008/2009



## Przekaz ładunku



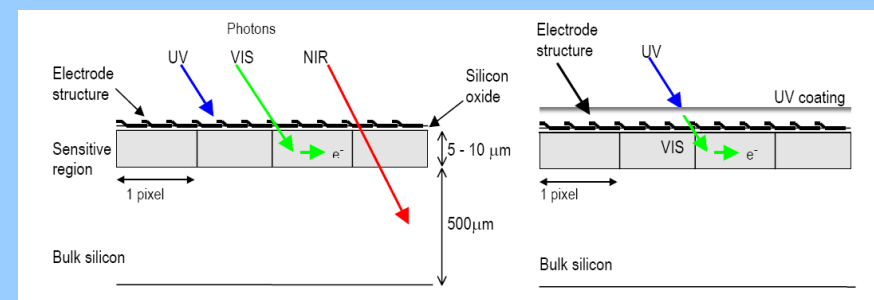
SL 2008/2009



## Wydajność kwantowa

front-illuminated CCD (FI)

front-illuminated CCD z pokryciem UV

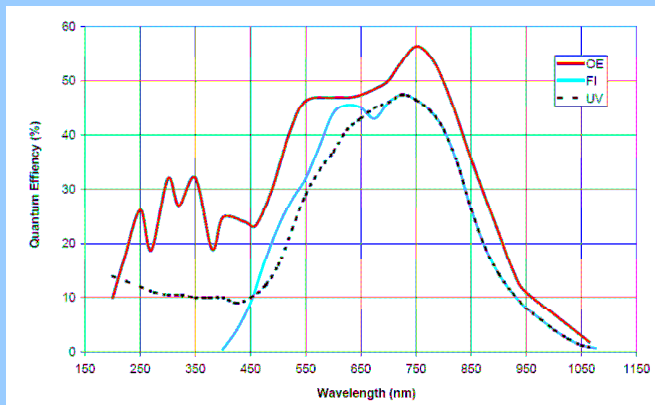


SL 2008/2009



## Wydajność kwantowa

front-illuminated CCD (FI)

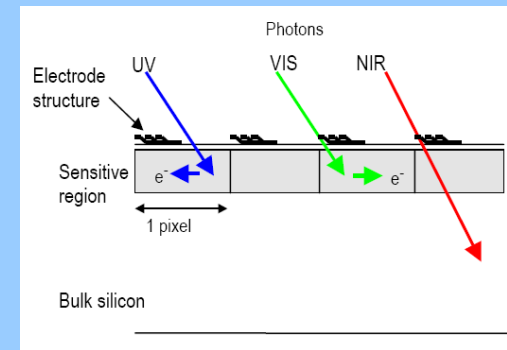


SL 2008/2009



## Wydajność kwantowa

open electrode CCD (OE): wzrost wydajności w zakresie UV

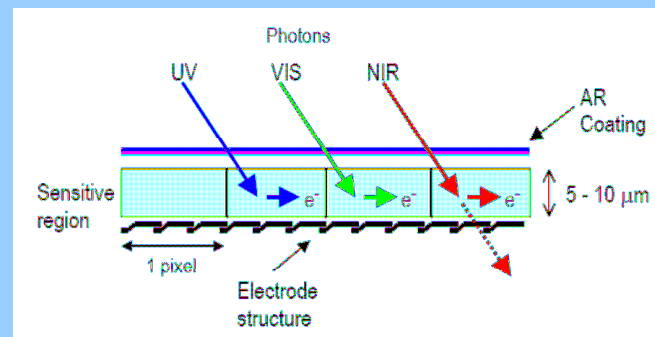


SL 2008/2009



## Wydajność kwantowa

back-illuminated CCD



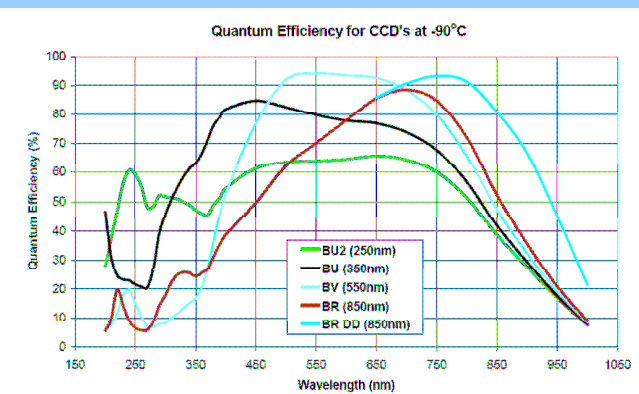
poprzez warstwę AR możliwa zmiana maksimum czułości

SL 2008/2009



## Wydajność kwantowa

back-illuminated CCD



SL 2008/2009